

저진동 차체 초기설계 및 해석기술 동향

임 홍 재
(국민대학교 기계설계학과 교수)

1. 머리말

자동차 차체에서 고려되는 중요한 설계기준은 운행중 차체가 받게 되는 동하중 이력, 승객의 느낌, 안전도 등으로 크게 나누어 요약할 수 있다. 자동차의 차체 구조물은 운행중 발생하는 여러가지 종류의 동하중을 견뎌내야 할 뿐만 아니라 주행시 도로로부터 들어오는 각종 외란에 대한 차체구조물의 동특성 응답이 승객에게 전달될 때 승객이 느끼게되는 소음과 진동이 범위내에 들어와야 된다. 또한 각종 법규로 규정되어 있는 충돌시 승객의 안전을 위해 차체구조물이 갖추어야 할 조건들을 만족해야 한다. 이중 어느것 하나도 차체 설계시 소홀히 할 수 없는 중요한 설계기준들이지만, 특히 진동소음 관련분야는 고객이 직접 주관적으로 느끼고 그 차의 성능 및 품질을 평가할 수 있기 때문에 선진 각국의 자동차회사들은 오래전부터 저진동 저소음 차체개발에 많은 노력을 경주해오고 있다. 우리나라에서도 최근 이 분야에 대한 관심이 높아지고 많은 연구가 활발히 진행되고 있다는 것은 바람직한 현상이라 하겠다. 여기에서는 초기설계 단계에서 저진동을 고려한 차체설계 및 해석기술의 최근동향을 저자가 경험한 바를

중심으로 간략히 소개하고자 한다.

2. 차체의 동특성 해석기술

자동차의 차체 구조물 설계시 고려되어야 할 기본적인 진동관련사항은 전체 차체시스템의 굽힘 모우드와 비틀림 모우드의 동적거동이라고 할 수 있다. 특히 차체설계시 이들 모우드들과 현가장치의 스프링질량(spungmass)의 모우드들과의 결합을 최소화하는 것은 필수적이다. 이렇게 이들 모우드들이 섞이는 것을 가능하면 최소화하려고 하는 이유는 쾌적한 주행감 및 구조물에 걸리는 하중을 최소화하고 자동차의 구조물의 신뢰도를 높이는 데에 필수적인 것이다⁽¹⁾. 그림 1은 특정한 차에 대한 차체설계시 진동모우드들의 설계요구조건의 한 예를 보여준다.

이와같은 설계의 요구조건을 만족시키기 위한 첫번째 방법이 자동차 구조물의 동특성 해석모델을 만드는 것이다. 차체의 동특성 해석은 최근까지만 하더라도 전적으로 시험결과에 의존했었다. 지난 10여년 동안 자동차 차체의 유한요소해석기술에 기초하여 만들어진 수치해석 모델에 차체의 진동특성해석의 실제적인 대안이 되어 왔고 미국을 비롯한 세계 각국에서 널리 쓰여지고 있다. 이런 방법을 사용

하면 시작차를 제작해 보기 전에도 도면에 의한 수치 및 재료의 물성치 데이터 등의 자료만 갖고도 모델을 만들어 볼 수 있다.

차체를 초기설계할 때에 주로 차체의 저주파수 영역의 진동모우드들이 기본적으로 이용되므로 차체의 유한요소해석모델을 상세하게 만들 필요가 없다. 즉 차체의 초기설계 단계에서는 50 Hz이하의 진동모우드들만 정확히 예측할 수 있어도 충분하므로 플레이트(plate) 요소 모델보다는 빔(beam)모델을 많이 사용하게 된다. 그러나 소음특성을 정확히 진단하기 위해서는 고주파수 영역까지 해석해야하므로 매우 세밀하게 짜른 플레이트요소를 사용한 상세모델을 써야만 한다. 빔 모델을 쓸 때에는 현재까지도 모델링 기법이 아직 명확히 확립되어 있지 않은 부분도 있으므로 주의가 요구된다. 예를 들면 각종 결합부의 강성도 계산, 용접부위, 유리와의 차체의 접합부 등에 대한 유한요소해석 모델링 분야를 들 수 있다. 이런 부분들에 대해서는 경험적인 방법이 주로 쓰이고 있으나 아직 이론적으로 확실하게 정립되어 있지 않은 분야의 모델링기술이 쓰여졌다면 반드시 실험을 통한 검증을 거쳐서 결과를 설계에 반영해야 한다. 이론적 검증이 뒷받침되는 명확한 해석기법을 확립하기 위

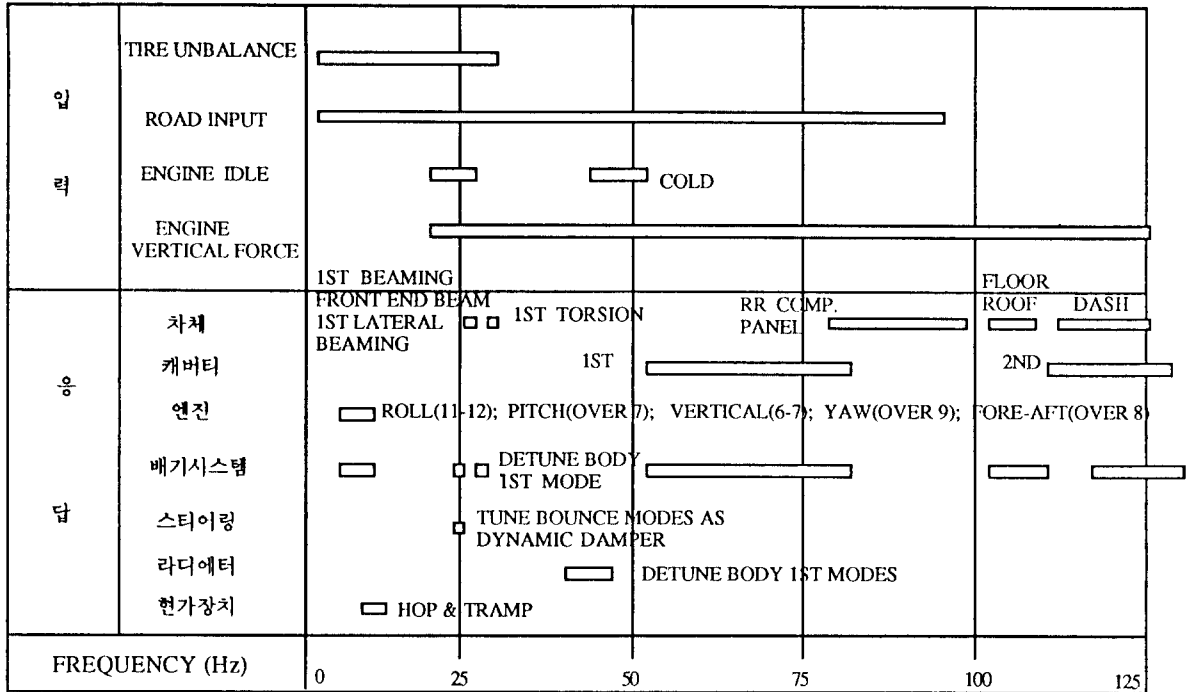


그림 1 차체설계시 주파수 요구조건의 예

해서는 앞으로 좀 더 많은 연구가 이루어져야 할 것이다.

3. 저진동 차체 설계기술

제품설계의 목표는 어떤 의미에서 최고의 제품을 만들어내는 데 있다. 전통적으로 사용되는 설계과정은 먼저 초기설계를 하고, 그 설계를 어떤 기준에 따라 평가한 다음 다시 그것을 개선할 수 있는 방법을 찾아서 설계를 개선하고 이런 과정을 끊임없이 반복해 나가는 것이다. 이 과정 중에서 변경된 설계를 평가하는 부분은 오랜동안 실제 시험이 가능한 경우에 국한되어 왔다. 그러나 이런 방법으로 자동차의 차체를 설계하려면 첫번째 시제품(prototype)의 제작 및 개선에만 적어도 수개월 이상의 시간이 걸리고 설계를 한번 개선하는데 걸리는 시간이 너무 지연되어서 결국 한 두번의 설계변경으로 끝나고 만다. 최근 컴퓨터를 이용한 해석기술의

발달은 좀 더 세밀하고 복잡한 실제 시스템도 그 수학적 모델을 가능하게 하였고 시험을 통하여서만 가능했던 평가과정의 많은 부분을 컴퓨터를 이용 대체할 수 있게 하였다. 즉 새로운 설계변경을 시도하는 데 걸리는 시간은 모델의 복잡한 정도에 따라 다르지만 하루 또는 몇 시간으로 단축할 수 있게 되었다.

1970년대에 들어와서 유한요소해석법은 자동차 차체의 구조물해석의 중요한 수단으로 자리잡기 시작했다. 자동차 차체 구조물의 유한요소 모델은 이제 자동차회사의 엔지니어들에게는 아주 친숙해졌고 없어서는 안 될 중요한 수단이 되었다. 그러나 이런 유한요소해석모델을 갖고 수치해석을 해 보았자 그것을 통해 알 수 있는 것은 그 설계가 설계목표에 맞는지 아닌지를 판단할 수 있을 뿐 어떻게 설계를 개선시킬 수 있는지는 직접적으로 알 수가 없다. 경험이 많은 엔

지니어라면 설계변경이 가능한 몇 가지 경우의 수에 대하여 유한요소 해석을 반복할 것이다(parameter study). 그리고 그 중에서 가장 최선의 설계를 선택할 것이다. 그러나 이런 방법은 전적으로 엔지니어의 경험에 의존해야 하고, 자동차처럼 복잡한 시스템의 경우는 간단히 예측할 수 없는 요인들이 너무나 많아 큰 어려움을 겪게 될 뿐만 아니라 실제에는 더 좋은 설계변경의 방안이 있다 하더라도 빠뜨리고 마는 경우도 충분히 생길 수 있는 것이다. 그러나 최적화기법을 도입하면 설계조건을 만족하면서 최적의 설계목표를 달성할 수 있도록 자동적으로 설계개선을 해 나갈 수 있게 된다. 즉 예를 들면 최적화의 목표함수를 차체무게로하고 특정한 고유기본 진동수의 범위를 설계의 구속조건으로 정해 놓으면 원하는 진동특성을 갖는 경량화된 차체를 설계할 수 있게 된다. 이때 설계변수는 강판의 두께, 보 단면의 형상

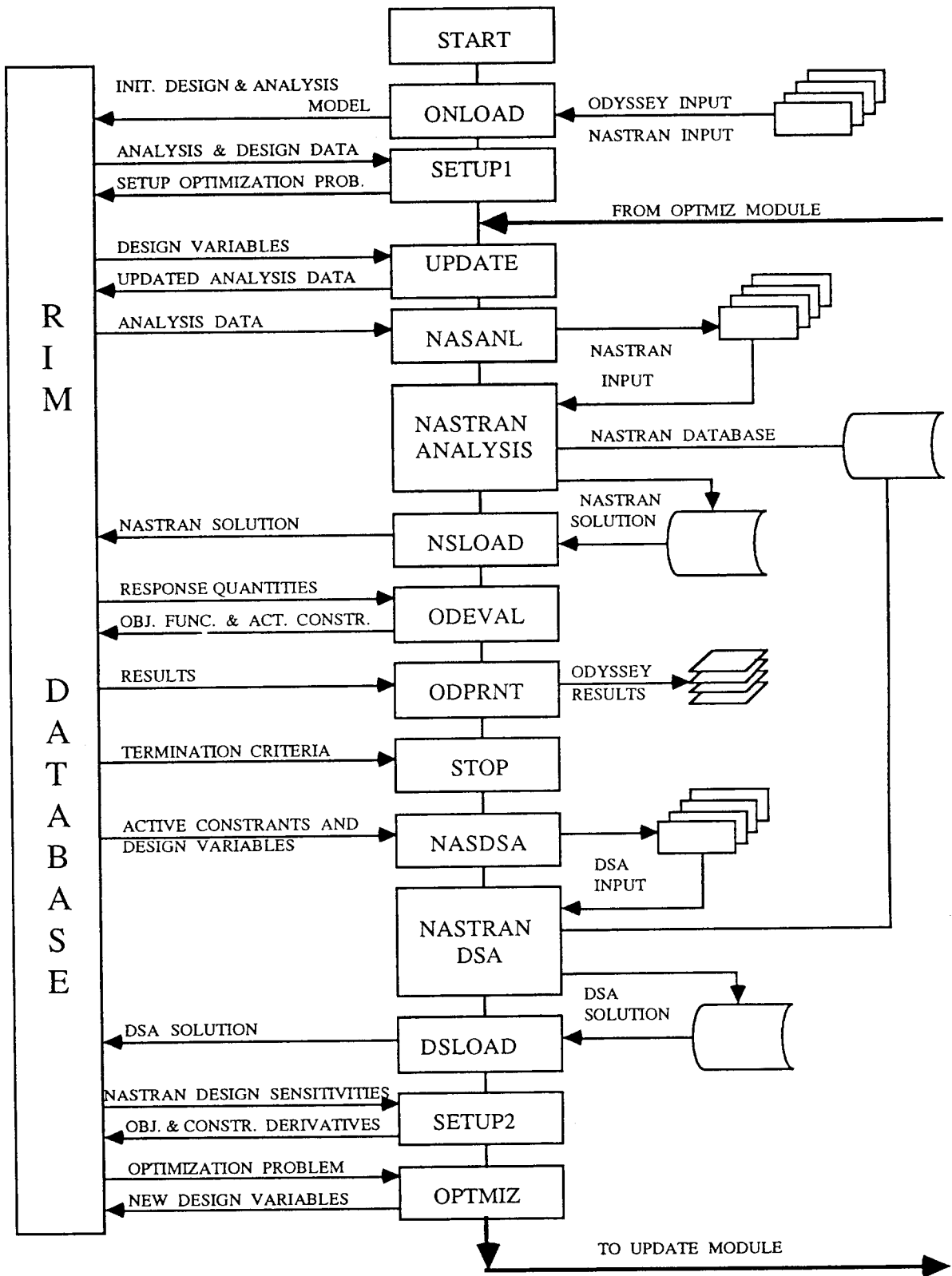


그림 2 ODYSSEY의 구성과 최적화 설계과정

및 크기를 결정하는 수치데이터 등이 될 것이다⁽²⁾.

GM사에서는 지난 10여년 간의 연구를 통해서 차체의 최적화 설계를 위하여 ODYSSEY라는 프로그램을 개발하였다^(3,4). GM사에서 사용하고 있는 최적화 설계기법을 간략히 소개하면 다음과 같다. GM사에서 개발하여 쓰여지고 있는 ODYSSEY라는 프로그램은 기존의 상용 유한요소해석 프로그램인 MSC/NASTRAN과 최적화 프로그램인 CONMIN을 보잉 항공사에서 개발한 데이터 베이스 관리 프로그램인 RIM⁽⁵⁾을 사용하여 통합된 하나의 소프트웨어 시스템으로 만들어 놓은 것이다. 그림 2는 ODYSSEY 프로그램의 구성 및 최적화 설계과정을 한눈에 보여준다. ODYSSEY안에서의 설계과정은 초기해석단계, 설계변경, 재해석 등의 일련의 과정이 주기적으로 반복되는 것이다. 그 과정을 좀 더 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

먼저 초기 단계에서는 다음과 같은 7가지의 과정이 한 주기를 이룬다.

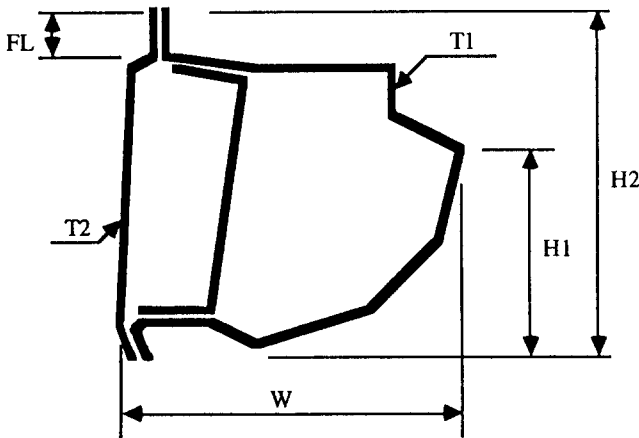
- (1) ODYSSEY 설계 모델 및 MSC/NASTRAN 유한요소해석 모델의 입력
 - (2) 최적화 문제준비
 - (3) 해석모델 갱신
 - (4) MSC/NASTRAN해석용 입력 데이터 준비
 - (5) MSC/NASTRAN 해석
 - (6) 해석결과 복원
 - (7) 목적함수 및 구속조건 검토
- 그 이후의 설계 사이클은 다음과 같은 10개의 과정으로 구성된다.

- (1) MSC/NASTRAN설계 민감도 해석을 위한 입력데이터 준비
- (2) MSC/NASTRAN설계 민감도 해석
- (3) 설계 민감도 해석결과 복원
- (4) 목적함수 및 구속조건의 미분치 계산
- (5) 근사적 최적화
- (6) 차체 구조해석 모델 갱신
- (7) 새로운 MSC/NASTRAN해

석용 입력 데이터 준비

- (8) MSC/NASTRAN 해석
- (9) 해석결과 복원
- (10) 목적함수 및 구속조건 재검토

ODYSSEY는 차체구조물의 유한요소해석 모델의 임의의 유한요소 한개 한개를 설계요소(design element)로 잡을 수 있으므로 엔지니어가 새로운 설계대안을 용이하게 만들어 낼 수가 있다. 즉 설계요소로 정해진 유한요소들에 대해서는 빔 단면의 폭, 높이, 그리고 강판의 두께 등을 설계변수(design variables)로 잡을 수가 있다. 이렇게 함으로써 해석모델에서는 단면의 면적이나 관성모멘트 등으로 표시되는 것들이 ODYSSEY결과에서는 실제단면의 크기 또는 두께 등의 데이터를 직접 얻어낼 수가 있다. 또한 ODYSSEY에서는 MSC/NASTRAN해석시 요구되는 빔 요소의 단면계수들도 자동으로 만들어져 제공된다.



X-SECTION DEFINITION

ELEMENT ID - 1304 (TYPE: 99)
 FL = 1.0 0.8 TO 1.1 (FLANGE)
 H1 = 7.3 7.0 TO 8.0 (HEIGHT)
 H2 = 9.5 9.0 TO 10.0 (HEIGHT)
 W = 12.0 10.8 TO 13.2 (WIDTH)

CONSTRAINT DEFINITION

1ST BENDING MODE > 20 HZ

1ST TORSIONAL MODE > 25 HZ

T1 = 1.1 1.0 TO 1.3 (ROCK-OUT)
 T2 = 0.9 0.8 TO 1.1 (ROCK-IN)
 T3 = 1.0 0.9 TO 1.1 (REINF)

그림 3 록커부위의 설계변수 구속조건의 예

그림 3은 차체의 록카(rocker) 부분을 ODYSSEY로 최적화 설계하기 위하여 준비된 설계 변수들을 보여준다. 즉 그림에서 보듯이 차체구조물의 복잡한 형상의 단면도 자유자재로 설계변수로 잡을 수 있어서 차체 전체의 구조를 최적화하기가 매우 편리하다. 또한 진동주파수 뿐만 아니라 특정 요소부위에 발생할 변형 및 응력 등도 설계구속 조건으로 잡을 수 있기 때문에 종합적인 최적화가 가능하게 되어 있다. 미국의 GM자동차 회사에서는 지난 6~7년 동안 이 최적화기법을 차체의 초기설계단계에서 적용함으로써 저주파수 영역의 차체 진동특성을 매우 효율적으로 개선시키고 있다.

4. 타 분야와의 인터페이스

차체시스템의 진동현상을 이해하

고 설계를 개선시키기 위한 새로운 대안을 제시할 수 있기 위해서는, 엔지니어는 유한요소 모델을 이용하여 차체의 동특성해석을 통한 분석종합(synthesis)을 한 후 그 결과들을 반드시 설명할 수 있어야 한다. 또한 설계개선을 위한 설계변경을 제시할 때에도 그것이 다른 분야 예를 들면 내구도 성능이라든지 안전도 문제 등에 어떤 영향을 미칠 것인지를 예측하여야 하고 정상상태 및 과도상태의 응답계산 등을 포함하는 더 많은 조사가 이루어져야 할 것이다. 또한 앞에서 기술한 최적화 설계기법을 이용할 경우에도 설계변수의 구속조건들이 차체의 조립이나 제작에 어떤 문제를 야기시키지는 않는지 반드시 검토되어야 한다. 실제로 새로운 차체모델이 결정되어 초기 설계에 들어가면 각 분야의 전문가들 즉 전문엔지니어들이 함께 모여서 머리

를 맞대고 협동해 나가야 한다. 그림 4는 진동차체 설계분야의 엔지니어가 다른 분야와의 인터페이스를 보여준다. 따라서 고급 엔지니어의 능력은 어떻게 수많은 설계과정을 효율적으로 총괄 관리해 나가느냐에 달려있다고 해도 과언이 아니다. 이때에 저주파수 영역의 진동특성을 고려한 최적설계기술은 모든 다른 분야의 해석모델 및 성능개선에 가장 기본이 되므로 이 분야의 좀더 체계적인 설계의 자동화 시스템개발이 중요하다.

5. 맺 음 말

이제까지 저진동 차체 설계에 관한 해석 및 설계기술에 대한 동향을 간략히 살펴보았다. 앞에서도 밝혔듯이 최근들어 자동차의 차체를 최적화 설계기법을 이용하여 수 많은 경우의 수에 대한 설계개선을

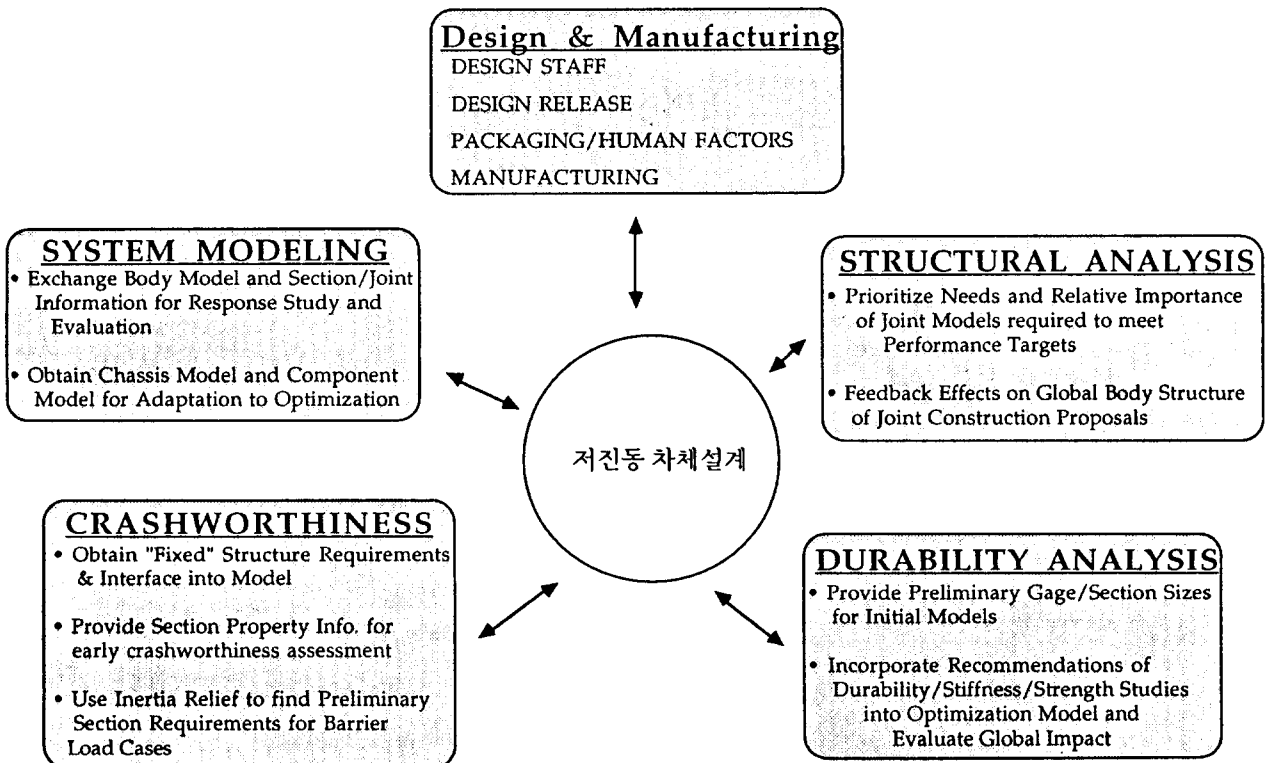


그림 4 저진동 차체설계 관련 타 분야의 인터페이스

시도하는 것이 현실적으로 가능해졌다. 이와같은 최적화기법을 사용하여 설계과정이 전산화된다면 시험을 통해서만 가능하던 일련의 설계과정을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 해결함으로써 설계에 소요되는 시간을 파격적으로 단축시키고 아울러 더 좋은 설계를 만들어 낼 기회를 그만큼 더 증대시킬 것이다. 요즘 선진국의 자동차업체에서는 초기 차체 설계과정의 속도가 더 빨라지고 설계에 소요되는 시간은 줄어드는 경향이 있다. 그러나 자동차 설계가 점점 더 복잡하여져서 엔지니어가 설계를 최적화하기 위해서는 어떤 단계가 필요한지를 알기가 점점 더 어려워지고 있다. 이제는 설계를 평가하는데 걸리는 시간보다는 설계과정을 통제 및 관리하여 그 설계를 어떻게 잘 개선할 수 있는가 하는 것이 엔지니어의 능력을 평가하는 데 더 중요한 기준이 될 것이다. 여기에서는 언급되지 않았지만 최근 들어와서 플

라스틱, 알루미늄, 복합재 등 여러 가지의 신소재들을 차체의 재료로 사용하기 위한 연구가 활발히 검토되고 있거나 이미 실용화 단계에 와 있는 것도 있다. 이러한 신소재를 사용하여 저진동 차체를 설계하기 위해서는 새로운 제작 및 가공기술의 개발이 선행되어야 함은 물론이고 앞에서 서술한 해석 및 설계기술이 뒷받침 되어야 한다는 것은 두 말할 나위가 없겠다. 끝으로 본 글을 작성함에 있어 필자가 알고 있는 정보 및 자료들을 근거로 서술하였기 때문에 필자의 주관적인 판단이 많이 포함되어 있다는 것을 밝혀 둔다.

참 고 문 헌

- (1) Kamal, M.M., and Wolf, J.A., 1987, Modern Automotive Structural Analysis, Van Nostrand Reinhold Co.
- (2) Bennett, J.A. and Nelson, M. F., 1979, "An Optimization Capability for Automotive Structures," SAE Transactions, Vol. 88, Paper No. 790972, pp. 3236~3243.
- (3) Botkin, M.E., Lust, R., and Katnik, R.B., 1986, "Structural Sizing Optimization Using and External Finite Element Program," GMR Research Report EM-644.
- (4) Song, J.O., 1987, "Integrated Optimum Structural Design System Using a Relational Database Management System," GMR Research Report GMR-5540.
- (5) Boeing Computer Service, 1983, "BCS RIM-Relational Information Management System Version 6.0 User Guide," Boeing Computer Service Co., Seattle, WA.